DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/55

Práticas e desafios para a descaracterização de barragens de rejeitos: uma revisão bibliométrica

Ian Henrique Pires
Mestrando em Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá - MG, Brasil, ianhpires@gmail.com

Adinele Gomes Guimarães
Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá - MG, Brasil, adinele@unifei.edu.br

RESUMO: Diante dos desastres envolvendo barragens de rejeitos no Brasil, em específicos aquelas construídas pelo método de alteamento a montante, a legislação brasileira passou por importantes alterações. A Lei Federal nº 14.066/2020, que alterou a Política Nacional de Segurança de Barragens, proibiu a construção e o licenciamento ambiental de novas barragens desse tipo e determinou a descaracterização das estruturas já existentes, ou seja, a alteração da função dessas estruturas para que não atuem mais como barramentos de contenção de rejeitos.O presente artigo tem por finalidade de conduzir uma revisão bibliométrica sobre a descaracterização de barragens e rejeitos de mineração. Para isso, a revisão foi realizada a partir da definição das palavras-chave (strings) e, em seguida, a busca na base de dados SCOPUS e o tratamento dos dados com o emprego da linguagem de programação R. A linguagem R é um software que permite a análise estatística dos dados de busca e a geração de gráficos.A produção acadêmica mundial referente ao tema apresentou um crescimento nos últimos 10 anos. Este aumento decorreu da influência dos desastres ocorridos no Brasil, que configura como um ponto de inflexão na produção científica.A literatura tem explorado a descaracterização sob diferentes abordagens, desde a fase de planejamento, custos, monitoramento, meio ambiente até a gestão de riscos.

PALAVRAS-CHAVE: Revisão bibliométrica, desastres, análise de dados, descaracterização de barragens.

ABSTRACT: In light of the disasters involving tailings dams in Brazil, specifically those constructed using the upstream raising method, Brazilian legislation has undergone significant changes. Federal Law No. 14,066/2020, which amended the National Policy on Dam Safety, prohibited the construction and environmental licensing of new dams of this type and mandated the closure of existing structures—that is, altering their function so they no longer serve as tailings containment barriers. The purpose of this article is to conduct a bibliometric review on the closure of mining tailings dams. To this end, the review was performed by defining keywords (strings), followed by a search in the SCOPUS database and data processing using the R programming language. The R language is a software that enables statistical analysis of search data and the generation of graphics. Global academic production on the subject has shown growth over the last 10 years. This increase resulted from the influence of the disasters that occurred in Brazil, which represent an inflection point in scientific production. The literature has explored closure through different approaches, ranging from the planning phase, costs, and monitoring to environmental aspects and risk management.

KEYWORDS**:** Bibliometric review; disasters; data analysis; dam closure.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de diversas nações. No entanto, a geração de grandes volumes de rejeitos, subprodutos do processo de beneficiamento de minerais, exigem medidas adequadas para seu armazenamento e disposição final. Barragens de rejeito são estruturas artificiais construídas para confinar esses materiais, mas falhas em sua construção, operação ou monitoramento podem levar a rompimentos catastróficos, com severas consequências ambientais e sociais.

Estudos indicam que, entre 1940 e 2010, ocorreram 214 falhas em sistemas de barragens de rejeitos de mineração, sendo 31% consideradas graves ou muito graves. A principal causa dessas falhas foi a deposição de rejeitos acima do permitido, combinada com gerenciamento inadequado, de acordo com Freitas e Silva (2019). Nesse sentido, é crescente as preocupações em relação a estabilidade física e à passagem de cheias dessas estruturas, além da garantia da estabilidade estrutural de fundações e área adjacentes, principalmente pelo aumento do número de barragens e envelhecimento de diversas estruturas existentes (Fernandes, 2022).

Este artigo tem como objetivo revisar e analisar criticamente a literatura científica sobre descaracterização de barragens de rejeitos, com foco nas implicações trazidas pela nova legislação brasileira e nas práticas de fechamento aplicadas. Por meio de revisão bibliométrica, busca-se identificar avanços, lacunas técnicas e desafios persistentes na gestão e desativação dessas estruturas.

2. METODOLOGIA

A pesquisa bibliométrica foi conduzida em duas bases de dados, sendo selecionadas aquelas mais destacam no ramo da engenharia, a saber: *Web of Science* e *Scopus*. A pesquisa foi realizada em janeiro de 2026, e compreende janeiro de 2000 a dezembro de 2025.

As palavras-chave (*strings*) atuam como pontos de acesso para encontrar trabalhos relevantes nas bases de dados. As palavras-chaves selecionadas e combinadas foram (em inglês): *tailing dam, closure, upstream dam, decommissioning e dam.*

As *strings*, no contexto da busca e análise de documentos científicos ou literatura acadêmica, consistem em sequências de palavras-chave cuidadosamente selecionadas para otimizar a recuperação de informações relevantes (Smith, 2020). Elas são construídas com base em critérios específicos, podendo incluir palavras-chave relacionadas a um tópico de interesse, nomes de autores relevantes, títulos de periódicos de renome, instituições de pesquisa renomadas ou áreas de pesquisa específicas (Jones, 2018).

Os operadores booleanos são ferramentas com objetivo de combinar ou excluir as palavras-chaves na pesquisa bibliométrica, de modo a restringir e gerar resultados mais precisos. Os principais operados booleanos são:

- AND: limita os resultados a artigos que contenham todas as palavras-chaves especificadas;
- OR: expande as possibilidades de pesquisa. Ele é utilizado para incluir artigos que tenham qualquer uma das palavras-chaves especificadas;
- AND NOT: é aplicado quando deseja excluir o termo ou palavra em específico da pesquisa.

A partir da escolha das *strings* para a pesquisa, elas foram combinadas com o uso dos operadores booleanos AND e OR. Para ambas as bases, a busca foi ajustada e aplica-se os termos apenas no título, resumo e palavras-chave de cada artigo. A Tabela 1 apresenta as combinações das *strings* utilizadas na pesquisa.

Tabela 1 – Strings utilizadas na pesquisa bibliométrica

	STRING	SCOPUS (TITLE-ABS-KEY)	WOS (TOPIC)
1	("Dam" OR "Upstream Dam" OR "Tailing Dam") AND ("Closure" OR "Decommissioning")	1065	559
2	(" Dam" AND "Closure")	883	478
3	("Tailing Dam" AND "Closure")	100	32
4	**("Tailing Dam" AND ("Closure" OR " Decommissioning"))**	**126**	**10**
5	("Upstream Dam" AND ("Closure" OR " Decommissioning")	9	6

Com base em uma avaliação quantitativa da pesquisa nas bases de dados, que serviu como critério primário para a seleção da *string*, e uma breve análise nos títulos e de alguns resumos dos artigos mais relevantes como critério secundário, a *string* número 4 foi selecionada como a mais adequada para conduzir a revisão bibliométrica

A base de dados selecionada para a revisão bibliométrica foi a *Scopus*, escolhida devido ao maior número de artigos *open acess* encontrados em relação a WOS, somada pela sua ampla cobertura de literatura científica na área de engenharia e ciências ambientais, pelas suas ferramentas analíticas robustas e pela qualidade dos artigos indexados.

O estudo foi baseado em um conjunto de dados bibliométricos exportado a partir do pacote Bibliometrix, contendo metadados de artigos científicos, incluindo títulos, palavras-chave e resumos; e analisados pela plataforma de Linguagem de Programação R. A análise concentrou-se especificamente no campo resumo (AB), uma vez que os resumos fornecem uma síntese padronizada dos objetivos, métodos e principais contribuições de cada estudo.

3. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A Figura 1 ilustra a produção acadêmica entre os anos 2000 e 2025, na base de dados Scopus. Com base no gráfico, notas-se três fases na produção acadêmica, a saber:

- Fase de estagnação (2000 - 2005): o tema de fechamento de barragens era incipiente. Com baixas produções ou nulas (2003 e 2004). O tema era pouco explorado e tampouco uma prioridade científica global nesse período;
- Fase de oscilação (2006 - 2018): observa-se o primeiro pico em 2006, seguido por uma produção científica irregular;
- Fase de crescimento (2019 – 2025): caracterizado por um crescimento exponencial a partir de 2019. O ano de 2023 marca o ápice da produção, com amis de 100 publicações acumulada. Embora os anos de 2024 e 2025, apresente uma retração, o patamar de publicações permanece superior às fases anteriores.

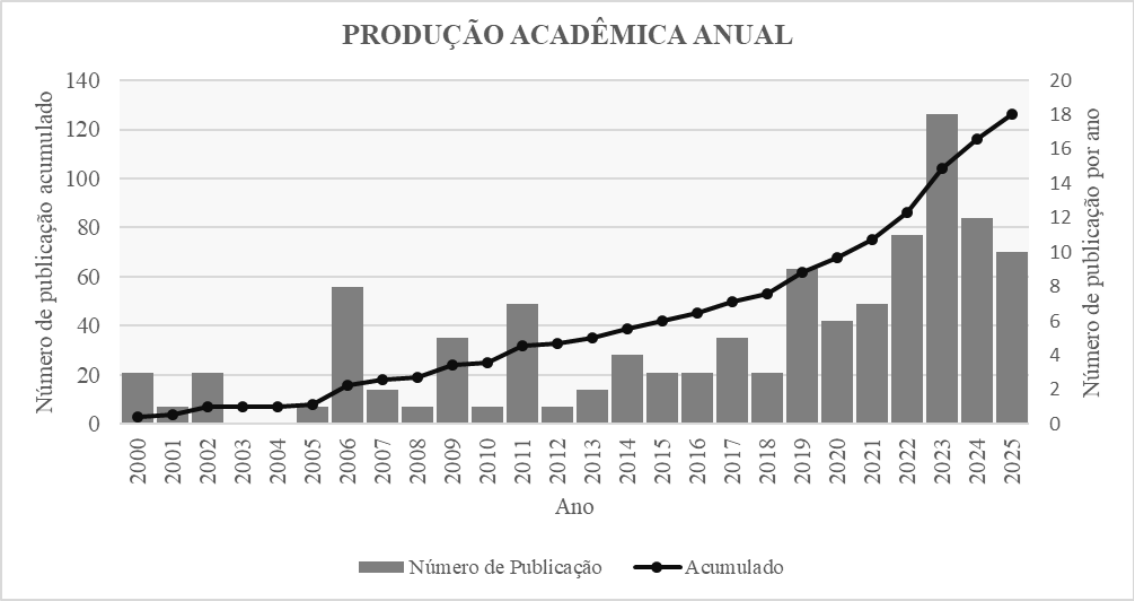


Figura 1: Produção Acadêmica anual sobre a descaracterização de barragens

O aumento súbito após 2019 pode estar associado aO desastre de grande magnitude na barragem de rejeitos de Brumadinho no Brasil, que geraram uma demanda global por estudos e rigor técnico sobre descaracterização e segurança no fechamento dessas estruturas.

A Figura 2 apresenta o número de publicações por país. Após o Brasil, destacam-se Austrália, Canadá, Estados Unidos e Espanha como fortes expoentes no número de artigos científicos publicados na área de fechamento de barragens de rejeitos. De acordo com Kossmann (2023), as principais reservas de minério de ferro estão localizadas no Brasil, Austrália, China, Índia, Ucrânia, Rússia, Estados Unidos, Canadá e África do Sul. Esses países, juntos, dominam a produção mundial.

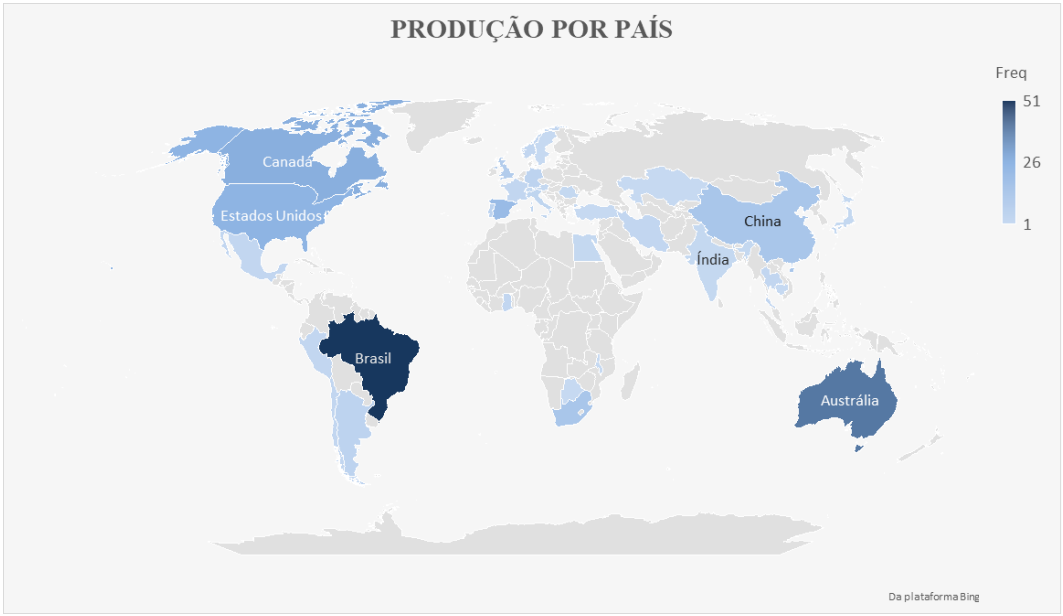


Figura 2. Produção científica por país

O gráfico de barras 100% empilhadas apresentado na Figura 3 apresenta a produção acadêmica ao longo do tempo dos principais países. O gráfico aponta que o tema era restrito a pouco países no início dos anos 2000, dominado pelo Estados Unidos e Austrália. A partir de 2006 observa-se a entrada de novos *players*, o Brasil e a Espanha começam destacar no cenário acadêmico. Em 2017 nota-se um salto expressivo na produção brasileira e em 2025 o Brasil atinge o apíce com 51 publicações, superandos os demais países.

O Canadá apresenta um crecimento linear e sólido, principalmente após o ano de 2018. Enquanto os Estados Unidades estabilizou-se o númeto de publicações na área, mas menos volumoso que a produção brasileira, auastraliana e canadense. Já a Austrália mantém-se uma produção robusta e crescente ao longo dos anos.

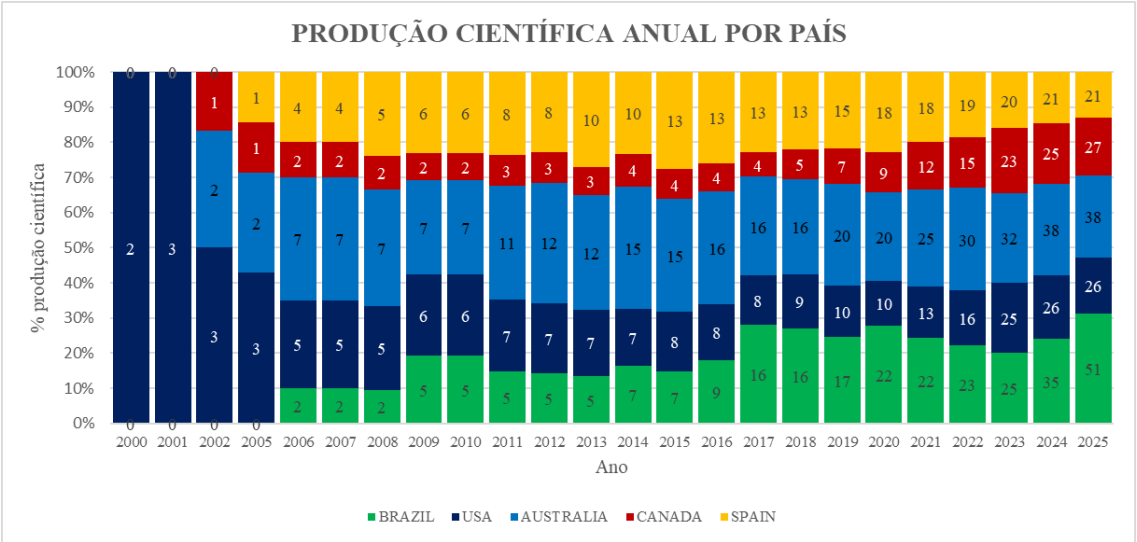


Figura 3: Produção científica por país nos últimos 25 anos

O gráfico apresentado na Figura 4 de Frequência de Palavras Anual complementa a análise bibliométrica com as quatros palavras mais utilizadas nos resumos dos artigos indexados. Assim como a Figura 1: Produção Acadêmica anual sobre a descaracterização de barragens, nota-se uma inflexão a partir do ano de 2015, principalmente pelas palavras *tailings*, *dam* ou *dams* e *mine* ou *mining*. Esse crecimento coincide com rompimaneto da barragem de Fundão no munícipio de Mariana em 2015, o que reforça a relação entre eventos críticos, pressão regulatória e intensificação da produção científica.

A ocorrência da palavra *closure* é mais acentuado nos anos mais recente, o que implica que há uma mudança de foco na fase operacional dessas estruturas para o fechamento e pós fechamentos das barragens de rejeitos. Também coicinde com o rompimento da barragem de rejeitos B1 no munícipio de Brumadinho em 2019.

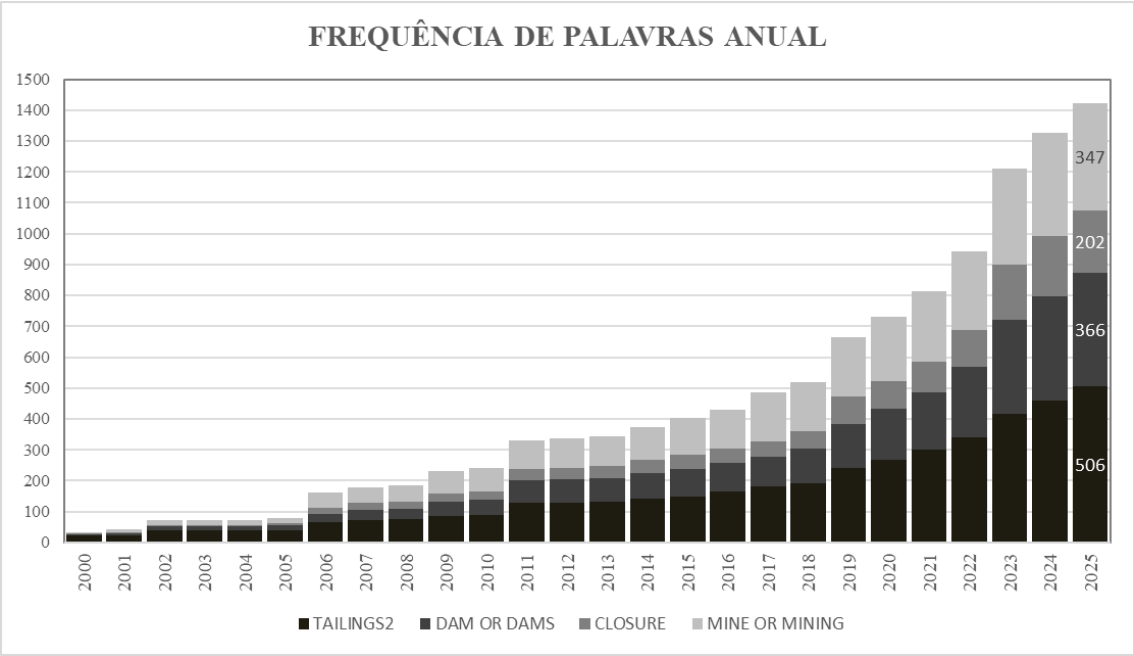


Figura 4. Frequência de palavras anual

A análise da Nuvem de Palavras (Figura5) sintetiza visualmente os temas centrais apresentados nos artigos da *String* 4 selecionada. Ela revela não apenas a frequência, mas a interconexão semântica entre os termos que compõem o estado da arte sobre barragens de rejeitos. O centro da nuvem é dominado pelos termos de maior peso, que servem como os pilares da pesquisa bibliométrica:

- *Tailings* e *Dam*: Aparecem com o maior destaque visual, o que é coerente com a frequência de 506 e 243 menções, respectivamente, identificada no gráfico de frequência anual.
- *Closure*: Ocupa uma posição central e de grande escala, confirmando que o foco do seu estudo — o fechamento de barragens de rejeitos — é um dos tópicos de maior relevância acadêmica atual.
- *Mining* e *mine*: Atuam como os conectores setoriais, contextualizando onde esses problemas e soluções se aplicam.

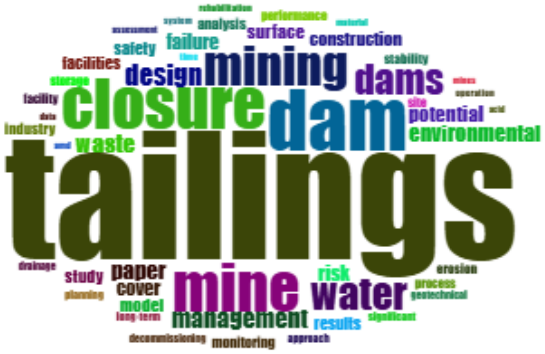


Figura 5. Nuvem de pontos

Ao redor dos termos de maior peso, observa-se as palavras como *desing, construction* e *facilities*, indicando que a pesuisa bibliometrica está ligada nos aspectos técnicos de projeto e infraestrutura. Também é observado as palavras *risk, safety, failure, stability* e *Environmental* o que remete a preocupação com a integridade física das estruturas e os impactos ambientais associados. As palavras *management, model, monitoring, planning e rehabilitation* sugere uma abordagem a longo prazo do ciclo de vida das barragens não apenas como a etapa final e isolada. .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliométrica apresentada neste artigo, fundamentada na análise de dados indexados na base *Scopus* entre 2000 e 2025, demonstra um crescimento acelerado e recente nas produções acadêmicas sobre a descaracterização e o fechamento de barragens de rejeitos de mineração. A aplicação da *String* 4 possibilitou a análise quantitativa de 126 documentos relevantes, permitindo um refinamento voltado especificamente para a fase final do ciclo de vida dessas estruturas.

Este crescimento correlaciona-se diretamente com o aumento expressivo da frequência dos termos *closure* e *tailings* nos artigos científicos, refletindo uma especialização temática na área. Nesse cenário, o Brasil surgiu como o epicentro da pesquisa sobre o fechamento de barragens, impulsionado pela necessidade urgente de respostas técnicas ante às recentes mudanças regulatórias nacionais frente aos recentes rompimentos de barragens de rejeitos no país. Como resultado, a produção científica brasileira superou a de países com consolidada tradição minerária, como Austrália, Canadá e Estados Unidos.

A análise da frequência de palavras revela uma mudança de paradigma no foco da discussão acadêmica: a abordagem anteriormente centrada na operação da estrutura (*Dam*) deu lugar a uma visão abrangente e gerencial, voltada para o fechamento seguro (*Closure*), a gestão de riscos, a estabilidade geotécnica e a mitigação de impactos ambientais. Em suma, o cenário atual reflete o fortalecimento de uma produção científica que posiciona o fechamento de barragens como um processo indispensável e multidisciplinar para a o setor mineral.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família e amigos, a UNIFEI e especialmente a minha coordenadora dO mestrado profissional Adinele Guimarães.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1º out. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm. Acesso em: 26 out. 2024.

FERNANDES, Rafaela Baldí. *Inspeção, monitoramento e estabilidade de barragens*: volume I. 1. ed. Curitiba: Appris, 2022. 473 p.

FREITAS, C. M; SILVA, M. A. da. *Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil*. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 21–29, 2019. DOI: 10.5327/Z1679443520190405. Disponível em: https://www.rbmt.org.br/details/416/pt-BR/acidentes-de-trabalho-que-se-tornam-desastres--os-casos-dos-rompimentos-em-barragens-de-mineracao-no-brasil. Acesso em: 22 maio 2025

KOSSMANN, C. H.. *Mercado do minério de ferro no Brasil e no mundo: demanda, consumo e preço*. 2023. 49 f. Monografia (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023